1М

УДК 681.518.5

В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко
Одесская государственная академия холода, Украина
Одесская национальная морская академия, Украина
romannn30@gmail.com, vlad_mihailenko@mail.ru

Использование нечеткого алгоритма Такаги-Сугено в адаптивных системах управления сложными объектами

Статья посвящена разработке адаптивной системы нечеткого вывода, реализующей алгоритм Такаги-Сугено для управления сложными объектами. Использование адаптивной нечеткой системы позволяет получить ожидаемую характеристику переходного процесса регулирования и достичь оптимальных критериев качества управления.

Введение

В последнее время в отечественных и зарубежных научных публикациях существенное внимание уделяется методам и алгоритмам создания интеллектуальных систем управления сложными объектами [1-5]. Известно, что сложные объекты имеют ряд отличительных свойств [5], наличие которых затрудняет функционирование автоматизированных систем управления (АСУ). И для получения ожидаемых характеристик АСУ, работающих в условиях неопределенности, особую актуальность в теории управления приобретают адаптивные подходы. Данные методы позволяют снизить затраты человеческого труда на расчеты новых значений настроек регуляторов, а также наладку и обслуживание средств автоматики. Одним из таких методов является создание алгоритмов самонастройки в широко используемых традиционных ПИ- и ПИД-регуляторах.

В ряде случаев автоматическая настройка регулятора (автонастройка), то есть корректировка значений параметров настройки, должна выполняться автоматически по требованию наладчика АСУ ТП. Также автонастройка может инициироваться при наступлении заранее заданного условия, например, при изменении нагрузки или внешних возмущающих воздействий на объект и т.д. Разновидностью адаптации является управление параметрами регулятора (табличная автонастройка), когда заранее найденные значения параметров регулятора для разных условий работы объекта заносятся в таблицу, из которой в дальнейшем извлекаются при наступлении условий, инициирующих адаптацию. Метод может быть использован для управления нелинейными объектами, нестационарными процессами или при необходимости изменять параметры в зависимости от заданных условий. Зная заранее возможные изменения режима работы объекта, например, варианты его нагрузки, специалисты выполняют идентификацию объекта для нескольких режимов и для каждого из них находят значения настроек регулятора по известным табличным формулам [6], [7]. В процессе функционирования системы измеряют параметры, которые характеризует режим работы объекта, и в зависимости от текущих значений выбирают коэффициенты ПИД-регулятора.

Другим направлением в развитии адаптивных регуляторов являются методы Ротача и Циглера-Николса [7]. Классические алгоритмы адаптации основаны на использовании генератора синусоидального сигнала (ГСС) с последующим выделением полезного сигнала или создании автоколебания с целью определения амплитуды и периода колебания. Однако не все производственные объекты допускают по своему технологическому регламенту вывод системы на границу устойчивости, а наличие ГСС порождает проблему фильтрации и длительности процесса идентификации.

Еще одним перспективным направлением в адаптации является использование нейронных сетей (НС), в силу своей самообучаемости НС, при правильно выбранной структуре и типе функции активации, позволяет в дальнейшем успешно прогнозировать ход процесса управления [2], [3]. Однако данный подход предполагает накопление большого количества информации о поведении объекта в условиях неопределенности и проведение обучения НС. В силу сложности и многофакторности возможностей изменения свойств объекта, структура НС может оказаться неадекватной.

В силу вышеизложенного в подавляющем большинстве ПИД-регуляторов используются методы настройки, основанные на формулах или таблицах. В последние годы в адаптивных АСУ заметно увеличилась доля регуляторов с нечеткой логикой или экспертных регуляторов. Применение данных контроллеров при управлении сложными объектами, в ряде случаев, оказывается эффективным [1], [5]. Для выполнения функции регулирования над нечеткими переменными должны быть выполнены операции, построенные на основании высказываний оператора, сформулированных в виде нечетких правил продукции. К недостаткам данного подхода можно отнести человеческий фактор, так как эксперт не всегда может учесть ключевые параметры управления из-за многообразия производственного процесса. В силу этого рассмотрим синтез традиционного табличного (формульного) и нечеткого подходов при разработке адаптивных АСУ.

Целью данной статьи является разработка нечеткой экспертной системы, реализующей алгоритм Такаги-Сугено и предназначенной для определения оптимальных настроек ПИ-регулятора. На рис. 1 представлена адаптивная автоматизированная система регулирования (ААСР), где E – ошибка, K – коэффициент усиления, T – постоянная времени объекта, τ – запаздывание, Z – задание, V – выходное значение, N – возмущение, U – управляющее воздействие, $K_р$, $T_и$, – настройки ПИ-регулятора.

.

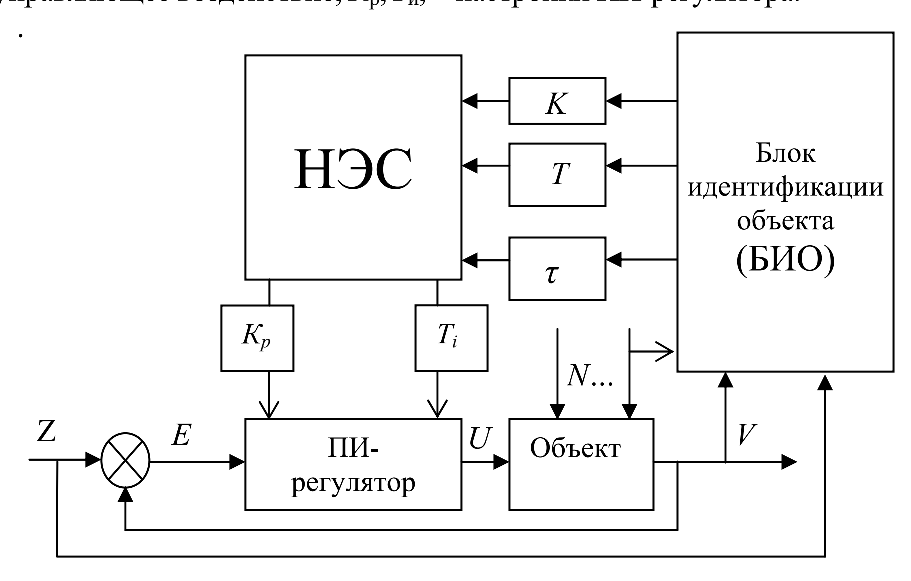


Рисунок 1 – Структура адаптивного нечеткого ПИ-регулятора с объектом управления

В задачу блока идентификации объекта (БИО) входит наблюдение и оценка значений параметров объекта регулирования. Нечеткая экспертная система (НЭС), получая данные значения, самостоятельно производит расчет новых настроек регулятора, усложняя его алгоритм (П, ПИ, ПИД), и осуществляет автонастройку. Наличие НЭС позволит стабилизировать процесс регулирования без участия оператора технологического процесса и остановки производства. Блок идентификации проводит пассивную идентификацию объекта, функционирующего в условиях неопределенности

Известно, что в сложных и динамических системах в ряде ситуаций определение свойств объекта или выделение его ключевых признаков может производить эксперт-технолог или наладчик АСУ ТП. В таком случае эксперту удобнее формализовать свое мнение в виде рассуждений: «запаздывание среднее», «коэффициент усиления высокий» и т.д. А для учета мнения эксперта значения параметров объекта должны быть фаззифицированы. К примеру, постоянная времени *T*, коэффициент усиления *K*, запаздывание τ лежат в диапазонах: малые (*M*), средние (*S*), большие (*B*). Например, в системах дозирования сыпучих материалов (СМ) оператор, наблюдая за расходом материала из дозатора, может словесно указать усиление или уменьшение расхода (*K*), запаздывание – время от включения ленточного транспортера до момента начала движения СМ, или разную емкость дозатора (*T*) в случаях залипания или зависания СМ на стенках дозатора (рис. 2) и т.п., где FE – расходомер, FC – регулятор расхода

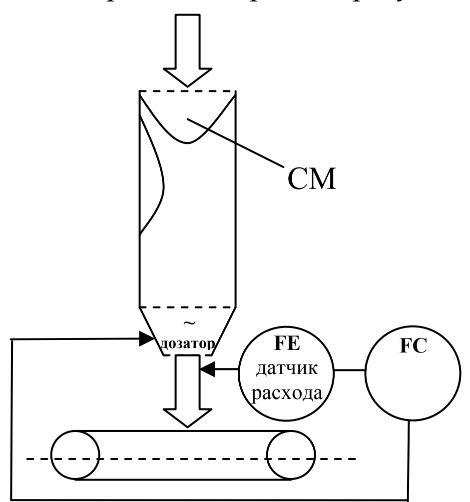


Рисунок 2 – Дозатор с СМ (сложный объект управления)

Разработка нечеткой экспертной системы

Принцип действия алгоритма Такаги-Сугено подробно проанализирован в работе [2] и заключается в рассмотрении правил продукции вида ЕСЛИ…ТО или (IF…THEN) только по одной нечеткости. То есть применяемые в нем правила нечетки только в части IF, тогда как в THEN присутствуют функциональные зависимости:

$$\begin{aligned} R^{(1)}&: \text{IF } (x_1 \textit{есть} A_1^1 \text{ AND } x_2 \textit{есть} A_2^1 \ldots \text{AND } x_n \textit{есть} A_n^1) \text{ THEN } y_1 = f^{(1)}(x_1, x_2, \ldots x_n), \\ R^{(N)}&: \text{IF } (x_1 \textit{это} A_1^N \text{ AND } x_2 \textit{это} A_2^N \ldots \text{AND } x_n \textit{это} A_n^N) \text{ THEN } y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \ldots x_n). \end{aligned} \quad (1)$$

где A_n – терм-множества. Допустим, что на вход НЭС подается сигнал $\bar{x} = (\overline{x_1}, \overline{x_2}, ..., \overline{x_n})$, который является вектором значений параметров объекта определенных БИО, то есть

$\bar{x} = f$(T_i, K_k, τ_j). Определим выходной сигнал НЭС $\bar{y} = f(K_{pi}, T_{иj}, K_{dn})$. Для правила $R^{(1)}$ рассчитываем:

$$w^1 = \begin{cases} \mu_{A_1^1}(\overline{x_1}),\ \mu_{A_{21}^1}(\overline{x_2}),\dots,\mu_{A_{n1}^1}(\overline{x_n}), \\ \min(\mu_{A_1^1}(\overline{x_1}),\ \mu_{A_{21}^1}(\overline{x_2}),\dots,\mu_{A_{n1}^1}(\overline{x_n}), \\ \text{или} \\ \mu_{A_1^1}(\overline{x_1}),\ \mu_{A_{21}^1}(\overline{x_2}),\dots,\ \mu_{A_{n1}^1}(\overline{x_n}). \end{cases} \quad (2)$$

На следующем этапе рассчитывается $\overline{y_1} = f^{(1)}(\overline{x_1}, \overline{x_2}, ...\overline{x_n})$.

Рассмотрим расчеты для остальных правил $R^{(k)}$, k = 2,…N. Для правила $R^{(N)}$ получаем:

$$\mu_{A_1^N}(\overline{x_1}),\quad \mu_{A_{21}^N}(\overline{x_2}),\dots,\mu_{A_n^N}(\overline{x_n}),$$

$$w^N = \begin{cases} \min(\mu_{A_1^N}(\overline{x_1}),\ \mu_{A_{21}^N}(\overline{x_2}),\dots,\mu_{A_n^N}(\overline{x_n}), \\ \text{или} \\ \mu_{A_1^N}(\overline{x_1}),\ \mu_{A_{21}^N}(\overline{x_2}),\dots,\ \mu_{A_n^N}(\overline{x_n}), \end{cases} \quad (3)$$

$$\overline{y_N} = f^{(N)}(\overline{x_1}, \overline{x_2}, ...\overline{x_n}).$$

Выходной сигнал НЭС Такаги-Сугено представляет собой нормализованную взвешенную сумму отдельных выходов $\overline{y_1}, ..., \overline{y_N}$, то есть

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^{N} w^k \overline{y_k}}{\sum_{k=1}^{N} w^k}. \quad (4)$$

В линейном случае базу правил НЭС запишем в виде:

$$\begin{aligned} &R^{(k)}: \text{IF}\left(x_1 \textit{есть} A_1{}^k \text{AND } x_2 \textit{есть} A_2{}^k \dots \text{AND} x_n \textit{есть} A_n{}^k\right) \\ &\text{THEN} y_k = c_0{}^{(k)} + c_1{}^{(k)} x_1 + \dots + c_n{}^{(k)} x_n \end{aligned},$$

где c_n – коэффициенты уравнения.

Предположим, что у объекта в ходе функционирования, происходит изменение значений параметров *К*, *Т*, τ на некотором диапазоне. И для обеспечения приемлемых показателей качества необходима перенастройка регулятора. Наладчик АСУ ТП при невозможности точного измерения всех параметров объекта проведет расчет настроек регулятора исходя из своего опыта, ориентируясь на значение выходной величины (расхода СМ) (рис. 2). В качестве примера рассмотрим НЭС с двумя правилами, моделирующими рассуждение эксперта – наладчика АСУ ТП.

$R^{(1)}$: ЕСЛИ (*T* есть малое И *K* есть малое И τ есть Малое) ТО $К_{р1} = 0{,}6/K(\tau/T)$, Ти1 = 0,6 Т, $R^{(2)}$: ЕСЛИ (*T* есть среднее И *K* есть высокое И τ есть среднее) ТО $К_{р2} = 0{,}7/K(\tau/T)$, $Т_{и2} = \tau + 0{,}7\ T$. Расчет настроек ПИ-регулятора осуществляется по формульному методу с учетом рекомендаций [5].

Определим значения выходных настроек ПИ-регулятора $\bar{y}$ для произвольных значений *T* = 10 с, *K* = 2,5; τ = 4 с. С учетом функций принадлежности, вид которых взят из рекомендаций [1], получаем функции принадлежности лингвистической переменной (рис. 3 – 5).

Фаззификация входных параметров

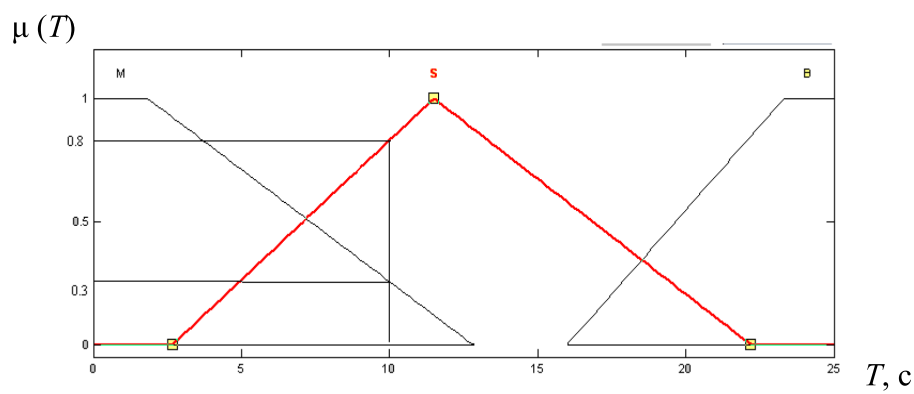


Рисунок 3 – Функции принадлежности лингвистической переменной (ЛП) «постоянная времени»

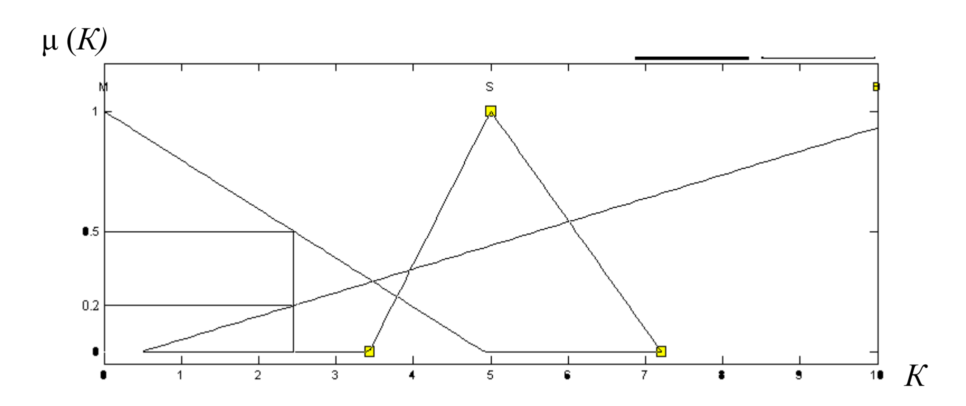


Рисунок 4 – Функции принадлежности ЛП «коэффициент усиления»

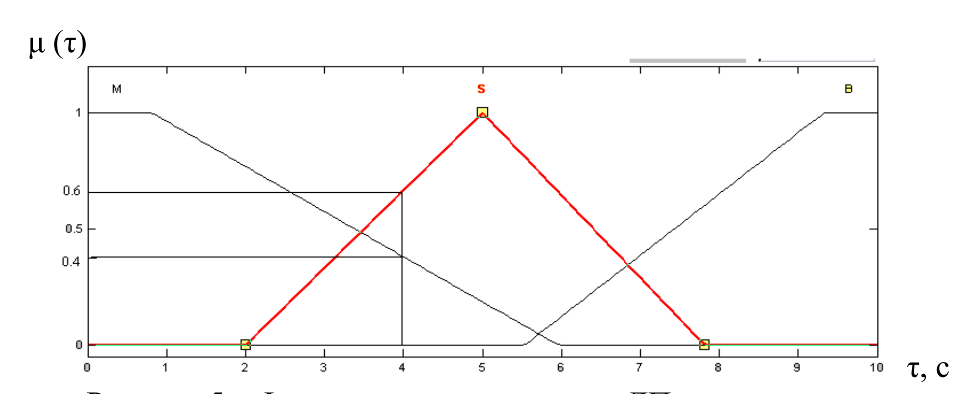


Рисунок 5 – Функции принадлежности ЛП «запаздывание»

Степени истинности по каждому правилу составят:
$R^{(1)}$: $\mu_{T\,1}^{1}$ (10) = 0,3; $\mu_{к\,1}^{1}$ (2,5) = 0,5; $\mu\,\tau_{1}^{1}$ (4) = 0,4,
$R^{(2)}$: $\mu_{T\,1}^{2}$ (10) = 0,8; $\mu_{к\,1}^{2}$ (2,5) = 0,2; $\mu\,\tau_{1}^{2}$ (4) = 0,6.

С учетом того, что взвешенные значения степеней истинности w^k (k=1,2) рассчитываются по (3), получаем w^1 = min (0,3; 0,5; 0,4) = 0,4; w^2 = min (0,8; 0,2; 0,6) = 0,2.

Также согласно (3) и $R^{(1,\,2)}$, $К_р^{1}$ = f (10; 2,5; 4) = 0,6; $Т_и^{1}$ = f (10) = 6; $К_р^{2}$ = f (10; 2,5; 4) = 0,7; $Т_и^{2}$ = f (10) = 11. С учетом (4) адаптивные значения настроек ПИ-регулятора составят $К_р$ = 0,63; $Т_и$ = 8,14. Таким образом, можно указать, что представленная модель является одним из вариантов нечеткого ПИ-регулятора.

Компьютерный эксперимент

Для проверки эффективности нечетких адаптивных и типовых формульных методов настроек с помощью программы MatLab (Simulink) [8] проводится компьютерный эксперимент (рис. 6). Значения настроек для типового регулятора ПИ$_1$ (рис. 6) рассчитаны по $R^{(1)}$ и составляют $К_р$ = 0,6, $Т_и$ = 6. Переходные процессы регулирования представлены на рис. 7.

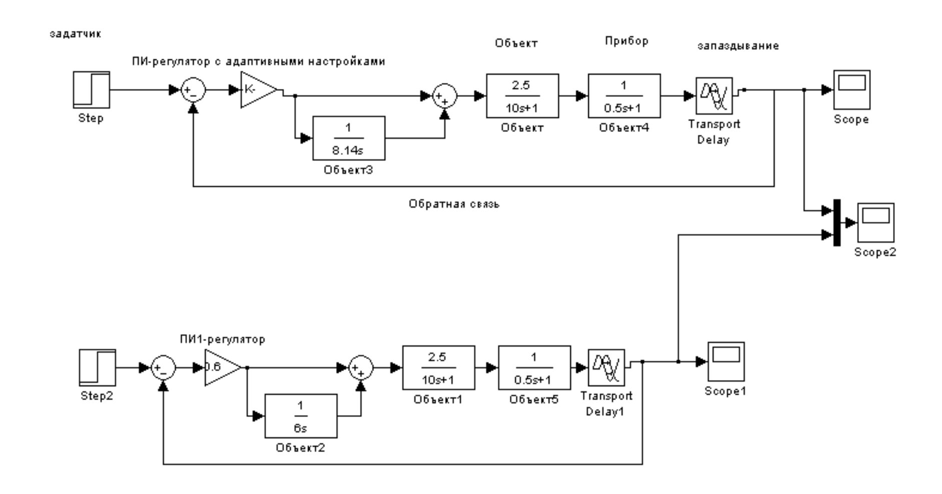


Рисунок 6 – АСР с ПИ-регулятором и объектом первого порядка с запаздыванием по каналу задания

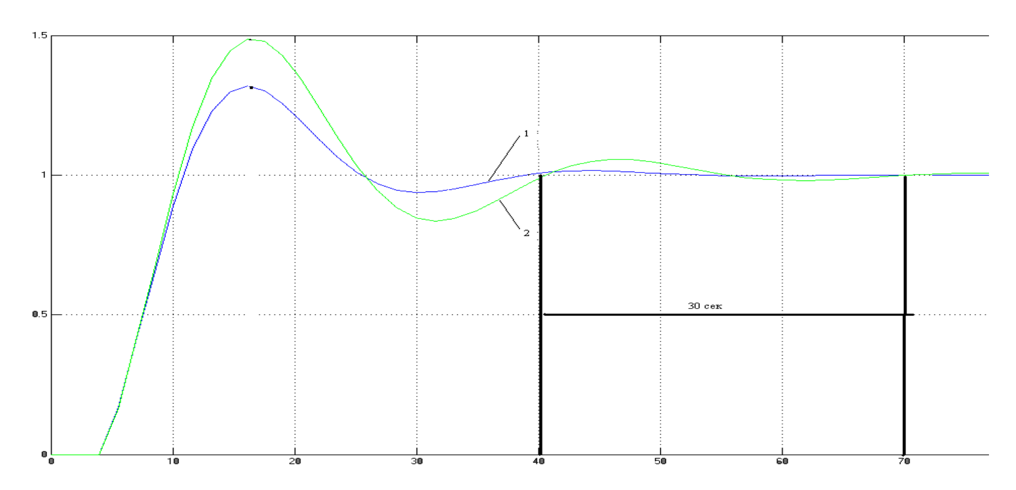


Рисунок 7 – Переходные процессы: 1 – метод нечетких адаптивных настроек, 2 – формульных

Заключение

Как видно из рис. 7, адаптивные настройки позволяют уменьшить время регулирования на 30 с по сравнению с табличными, что в производственных условиях способствует экономии энергоресурсов при работе исполнительных механизмов. Перерегулирование при использовании нечеткого и формульного подходов составляет соответственно $G^{н}$ = 23%, $G^{ф}$ = 33,3%. Можно отметить, что применение нечеткого

алгоритма может быть применимо и для автонастроек ПИД-регуляторов. Таким образом, совместное использование табличного и нечеткого научных подходов при разработке адаптивных АСУ позволит учитывать опыт и знания технологов и специалистов-наладчиков, а также упростить модернизацию типовых систем регулирования на отечественных предприятиях.

Литература

1. Леоненков А.Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / Леоненков А.Ю. – С-Пб. : БХВ, 2003. – 720 с.
2. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. ; [пер. с польск. И.Д. Рудинского]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
3. Сигеру Омату. Нейрокомпьютеры и их применение / Сигеру Омату ; [пер с англ.]. – М. : ИПРЖР, 2000. – 272 с.
4. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / [Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др.]. – М. : Радио и связь, 2002. – 304 с.
5. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / Штовба С.Д. – М. : Горячая линия. – 288 с.
6. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Поспелов Д.А. – М. : Наука, 1985. – 288 с.
7. Ротач В.Я. Теория автоматического управления / Ротач В.Я. – М. : МЭИ, 2008. – 396 с.
8. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7 : [Самоучитель] / Дьяконов В.П. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 781 с.

Literatura

1. Leonenkov A.Y. S.-Ptb.: BHV. 2003. 720 p.
2. Rutkovskaya D. Moscow : Gorjachaia linija – Telecom. 2006. 452 p.
3. Shigeru Omata. Moscow : IPRZHR . 2000. 272 p.
4. Borisov A.N. Moscow : Radio i Sjaz. 2002. 304 p.
5. Shtovba S.D. Moscow : Gorjachaia linija. 288 p.
6. Pospelov, D.A. Moscow : Nauka. 1985. 288 p.
7. Rotach V.Ya. Moscow : MEI. 2008. 396 p.
8. Dyakonov V.P. Moscow : DMK-Press. 2008. 781 p.

В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко

Використання нечіткого алгоритму Такагі-Сугено в адаптивних системах керування складними об’єктами

Стаття присвячена розробці адаптивної системи нечіткого виводу, що реалізує алгоритм Такагі-Сугено для керування складними об’єктами. Використання адаптивної нечіткої системи дозволяє досягнути очікуваної характеристики перехідного процесу регулювання та досягнути оптимальних критеріїв якості керування.

V.S. Mihailenko, R.Y. Harchenko

Using of Takagi-Sugeno Fuzzy Logic in the Adaptive System for Controlling Complex Objects

The article is devoted to the development of an adaptive fuzzy inference system implementing the algorithm Takagi-Sugeno for the management of complex objects. Using of adaptive fuzzy system can achieve the expected performance of the transition process control and achieve optimum criteria of quality control.

Статья поступила в редакцию 20.04.2011.